

Attorney Docket No. 05788.0171  
Customer Number 22,852

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

*Priority  
Wicksa  
2-8-02*

In re Application of:

Marco NASSI et al.

Serial No.: 09/885,940

Filed: June 22, 2001

For: SUPERCONDUCTING CABLE

)  
)  
) Group Art Unit: 1751  
)  
) Examiner: Not Yet Assigned  
)  
)  
)  
)

Assistant Commissioner for Patents  
Washington, DC 20231

Sir:

**CLAIM FOR PRIORITY**

Under the provisions of 35 U.S.C. § 119, Applicants hereby claim the benefit of the filing date of European Patent Application No. 98204401.8, filed December 24, 1998, for the above-identified U.S. patent application.

In support of this claim for priority, enclosed is one certified copy of the priority application.

Respectfully submitted,

FINNEGAN, HENDERSON, FARABOW,  
GARRETT & DUNNER, L.L.P.

By:

*[Signature]*  
Ernest F. Chapman  
Reg. No. 25,961

Dated: October 10, 2001

EFC/FPD/sci  
Enclosures

LAW OFFICES  
FINNEGAN, HENDERSON,  
FARABOW, GARRETT,  
& DUNNER, L.L.P.  
1300 I STREET, N. W.  
WASHINGTON, DC 20005  
202-408-4000



Europäisches  
Patentamt

European  
Patent Office

Office européen  
des brevets



Bescheinigung Certificate

Attestation

Die angehefteten Unterla-  
gen stimmen mit der  
ursprünglich eingereichten  
Fassung der auf dem näch-  
sten Blatt bezeichneten  
europäischen Patentanmel-  
dung überein.

The attached documents  
are exact copies of the  
European patent application  
described on the following  
page, as originally filed.

Les documents fixés à  
cette attestation sont  
conformes à la version  
initialement déposée de  
la demande de brevet  
européen spécifiée à la  
page suivante.

Patentanmeldung Nr. Patent application No. Demande de brevet n°

98204401.8

Der Präsident des Europäischen Patentamts:  
Im Auftrag

For the President of the European Patent Office

Le Président de l'Office européen des brevets  
p.o.

I.L.C. HATTEN-HECKMAN

DEN HAAG, DEN  
THE HAGUE, 19/01/00  
LA HAYE, LE



Europäisches  
Patentamt

European  
Patent Office

Office européen  
des brevets

**Blatt 2 der Bescheinigung**  
**Sheet 2 of the certificate**  
**Page 2 de l'attestation**

Anmeldung Nr.:  
Application no.:  
Demande n°: 98204401.8

Anmeldetag:  
Date of filing: 24/12/98  
Date de dépôt:

Anmelder:  
Applicant(s):  
Demandeur(s):  
PIRELLI CAVI E SISTEMI S.p.A.  
20126 Milano  
ITALY

Bezeichnung der Erfindung:  
Title of the invention:  
Titre de l'invention:  
Superconducting cable

In Anspruch genommene Priorität(en) / Priority(ies) claimed / Priorité(s) revendiquée(s)

Staat:  
State:  
Pays:

Tag:  
Date:  
Date:

Aktenzeichen:  
File no.  
Numéro de dépôt:

Internationale Patentklassifikation:  
International Patent classification:  
Classification internationale des brevets:  
H01B12/16

Am Anmeldetag benannte Vertragsstaaten.  
Contracting states designated at date of filing: AT/BE/CH/CY/DE/DK/ES/FI/FR/GB/GR/IE/IT/LI/LU/MC/NL/PT/SE  
Etats contractants désignés lors du dépôt:

Bemerkungen: The original title of the application in Italian reads as follows : Cavo superconduttore  
Remarks:  
Remarques:

superconduttore, si intende indicare un materiale, come ad esempio particolari leghe niobio-titanio, o materiali ceramici a base di ossidi misti di rame, bario e ittrio ovvero di bismuto, piombo, stronzio, calcio, rame, tallio e mercurio, comprendenti una fase superconduttiva avente una resistività pressoché nulla al di sotto di una particolare temperatura, definita come temperatura critica (nel seguito anche brevemente indicata come  $T_c$ ).

Con il termine di: cavo superconduttore, si intende indicare un cavo destinato al trasporto di corrente elettrica comprendente almeno un elemento conduttore includente uno strato di materiale superconduttore.

Con il termine di cavo convenzionale o resistivo, o materiale conduttore di tipo resistivo, si intende un cavo comprendente materiale conduttore non superconduttore, cioè impiegante elementi conduttori elettrici a resistenza non nulla.

Nel seguito della descrizione e nelle successive rivendicazioni, infine, con il termine di: cavo per alta potenza, si intende indicare un cavo destinato al trasporto di quantità di corrente, generalmente superiori a 3000 A, tali per cui il campo magnetico indotto inizia a ridurre il valore della densità di corrente massima conseguibile in condizioni di superconduttività.

## 25 Tecnica nota

Nel settore dei cavi superconduttori, è particolarmente avvertito il problema di proteggere il cavo dalle sovracorrenti di corto circuito garantendo che, qualora si verifica un corto circuito, il materiale superconduttore venga mantenuto in condizioni di superconduttività e, cioè, al di sotto della sua temperatura critica.

La tecnica nota suggerisce di affrontare questo problema proponendo una serie di criteri di stabilità aventi come denominatore comune quello di mantenere il cavo al di sotto

PIRELLI CAVI E SISTEMI S.p.A.

- 1 -

Titolo: Cavo superconduttore

Titolare: PIRELLI CAVI E SISTEMI S.p.A.

#### DESCRIZIONE

##### Campo dell'invenzione

- 5 In un suo aspetto generale, la presente invenzione si riferisce ad un cavo destinato al trasporto di corrente elettrica in condizioni cosiddette di superconduttività e, cioè, in condizioni di resistenza elettrica pressoché nulla.
- 10 Più in particolare, l'invenzione si riferisce ad un cavo superconduttore (1) ad almeno una fase comprendente:
- a) uno strato di nastri comprendenti materiale superconduttore (20);
- b) un elemento tubolare (6) per il supporto di detto strato di nastri comprendenti materiale superconduttore (20),  
15 detto elemento tubolare comprendendo almeno una porzione in materiale metallico, ed essendo in contatto elettrico con lo strato di nastri comprendenti materiale superconduttore (20);
- 20 c) un circuito di raffreddamento, atto a raffreddare il materiale superconduttore ad una temperatura di esercizio non superiore alla sua temperatura critica, comprendente un fluido ad una pressione operativa prefissata variabile tra un valore minimo ed un valore massimo;
- 25 in cui la deformazione di detti nastri comprendenti materiale superconduttore, in corrispondenza ad una escursione termica tra la temperatura ambiente e la temperatura di esercizio del cavo è inferiore alla deformazione critica dei nastri stessi.
- 30 Nel seguito della descrizione e nelle successive rivendicazioni, con il termine di: materiale

sovracorrente passa nel conduttore normale. Tale trasporto di corrente ad opera del conduttore normale implica una dissipazione energetica all'interno dello stesso che - in presenza di una adeguata quantità di metallo - consente al  
5 materiale superconduttore di ritornare al suo stato superconduttivo una volta terminato il transitorio di corto circuito.

Nelle pubblicazioni sopra citate, accanto ai criteri di stabilità piena e limitata, vengono inoltre descritti i  
10 criteri di stabilità dinamica e adiabatica. Un ulteriore criterio di criostabilità, descritto nella seconda delle suddette pubblicazioni ed in T. Ito and H. Kubota, Cryogenics 29, 621-624 (1989), è il cosiddetto criterio di  
15 stabilità legata alla minima zona di propagazione (MPZ). Tale criterio prevede anch'esso l'associazione al materiale superconduttore di un conduttore normale e consente di realizzare la stabilizzazione del cavo superconduttore in relazione alla conducibilità in direzione longitudinale dei materiali.  
20 I criteri di stabilità sopra descritti possono essere applicati ai cavi superconduttori tal quali o anche in combinazione tra loro.

La domanda di brevetto EP97202433.5 a nome della Richiedente descrive dei nastri superconduttori, accoppiate  
25 a lamine metalliche, aventi una deformazione a trazione massima più grande del 3 %.

La Richiedente ha notato che l'applicazione del criterio di stabilità piena e adiabatica ai cavi superconduttori e soprattutto a quelli in cui vengono impiegati materiali  
30 superconduttori ad alta temperatura, comporta una serie di inconvenienti. Infatti, per rispondere appieno a tale criterio di stabilità è necessario utilizzare una notevole quantità di materiale metallico (conduttore normale) con l'insorgere di tutta una serie di inconvenienti correlati  
35 da un lato all'elevato peso e volume del cavo che ne

PIRELLI CAVI E SISTEMI S.p.A.

- 3 -

della sua temperatura critica dopo il transitorio di corto circuito.

- Una disamina dei criteri di stabilità dei cavi superconduttori viene, in particolare, effettuata da E. W. Collings, "Flux-jump stability and cryostability in ceramic superconductors for 20 K", MRS Int'l. Mag. on Adv. Mats. Vol. 6, 1989 Materials Research Society, e "Conductor design with High-Tc ceramics -- a review", 2nd Int. Symposium on Superconductivity, Nov. 1989, Japan.
- 10 In tali pubblicazioni viene fatta una distinzione fra criteri di criostabilità e criteri di "flux-jump stability", intendendo indicare con questo termine la stabilizzazione del cavo superconduttore in seguito al manifestarsi di picchi di flusso al suo interno.
- 15 In particolare, i criteri di criostabilità descritti nelle suddette pubblicazioni vengono a loro volta distinti in stabilità piena o limitata qualora venga associato al superconduttore un materiale conduttore normale adeguatamente raffreddato, che consenta di recuperare lo
- 20 stato superconduttivo dopo che la sovracorrente abbia portato il superconduttore allo stato normale per tutta la sua lunghezza o, rispettivamente, per una lunghezza limitata di esso.
- Tali criteri di criostabilità piena e limitata hanno come
- 25 base comune quella di utilizzare nel cavo una quantità prefissata di materiale metallico avente la funzione di conduttore normale durante il transitorio di corto circuito ed atto sia a consentire il passaggio attraverso di esso della sovracorrente di corto circuito, sia a smaltire il
- 30 calore generato durante il corto circuito stesso limitando l'aumento di temperatura nel materiale superconduttore in modo da rimanere al di sotto della sua temperatura critica.

Durante il corto circuito, infatti, il materiale superconduttore perde le sue capacità superconduttive e

35 diventa un cattivo conduttore di elettricità, per cui la

circuito inferiore alla temperatura minima fra la temperatura critica del materiale superconduttore e la temperatura di ebollizione di detto fluido di raffreddamento alla minima pressione operativa di detto  
5 fluido.

Preferibilmente, la quantità di materiale metallico in contatto elettrico con detto strato ed in particolare quella presente nell'elemento di supporto dello strato di materiale superconduttore viene determinata applicando il  
10 criterio di stabilità piena ed adiabatica riportato nel seguito della descrizione.

In accordo con l'invenzione, è possibile attenuare le sollecitazioni longitudinali che si generano nel materiale superconduttore durante il suo raffreddamento a causa  
15 dell'impossibilità di una contrazione libera, limitando quindi il verificarsi di un danneggiamento del materiale superconduttore e di conseguenza la diminuzione della capacità di trasporto in condizioni di superconduttività.

In un suo secondo aspetto, l'invenzione si riferisce a un  
20 elemento conduttore per cavi superconduttori comprendente almeno uno strato di materiale superconduttore incorporato all'interno di un rivestimento metallico, supportato da un elemento tubolare comprendente una quantità prefissata di materiale metallico con il quale è in contatto elettrico,  
25 detto strato di materiale superconduttore è raffreddato mediante un fluido di raffreddamento ad una temperatura non superiore alla sua temperatura critica, caratterizzato dal fatto che è presente una prefissata quantità di materiale conduttore di tipo resistivo in contatto elettrico con lo  
30 strato di materiale superconduttore, tale che la temperatura massima raggiunta dal materiale superconduttore in caso di corto circuito inferiore alla temperatura minima fra la temperatura critica del materiale superconduttore e la temperatura di ebollizione di detto fluido di  
35 raffreddamento alla minima pressione operativa di detto fluido.



PIRELLI CAVI E SISTEMI S.p.A.

- 5 -

rendono problematica la fabbricazione, ne limitano la lunghezza massima e ne rendono più difficoltosa l'installazione e, dall'altro lato, all'elevato costo complessivo del cavo che ne consegue.

- 5 Inoltre la Richiedente ha percepito che l'utilizzo di materiale metallico quale elemento di supporto del materiale superconduttore, genera l'insorgere di sforzi che tendono a deformare quest'ultimo durante il raffreddamento del cavo a causa del differente coefficiente di dilatazione termica del metallo impiegato rispetto a quello del  
10 materiale superconduttore stesso.

Ha infatti riscontrato che durante il raffreddamento del cavo dalla temperatura ambiente alla temperatura del fluido refrigerante impiegato (ad esempio azoto liquido) nella  
15 configurazione di utilizzo a teste bloccate, gli elementi che compongono il cavo superconduttore vengono sottoposti ad una serie di sollecitazioni, sia in senso radiale (a causa dei differenti coefficienti di dilatazione termica dei materiali che li costituiscono), che in senso  
20 longitudinale (a causa della configurazione a teste bloccate) che rischiano di danneggiare il materiale superconduttore.

A questo riguardo, particolarmente dannose sono le sollecitazioni che si generano in senso longitudinale sullo  
25 strato di materiale superconduttore, in quanto possono provocare il manifestarsi di cricche superficiali che ne comprometterebbero le capacità di trasporto di corrente in condizioni di superconduttività.

In accordo con un primo aspetto l'invenzione si riferisce a  
30 un cavo superconduttore del tipo più sopra indicato, il quale si caratterizza per il fatto che è presente una prefissata quantità di materiale conduttore di tipo resistivo in contatto elettrico con lo strato (20) di materiale superconduttore, tale che la temperatura massima  
35 raggiunta dal materiale superconduttore in caso di corto

In un suo terzo aspetto, la presente invenzione si riferisce ad un metodo atto a limitare le sollecitazioni indotte longitudinalmente in un nastro di materiale superconduttore di un cavo superconduttore comprendente le  
5 fasi di:

- predisporre almeno un elemento tubolare per il supporto di un nastro di materiale superconduttore comprendente una quantità prefissata di materiale metallico, detto elemento tubolare essendo in contatto elettrico con un nastro di  
10 materiale superconduttore,

- avvolgere detto nastro di materiale superconduttore a elica sulla superficie di detto almeno un elemento tubolare di supporto,

- raffreddare il materiale superconduttore ad una  
15 temperatura non superiore alla sua temperatura critica mediante un fluido di raffreddamento,

caratterizzato dal fatto di comprendere le fasi di:

- accoppiare almeno una lamina di rinforzo di materiale metallico accoppiata a detto nastro di materiale  
20 superconduttore,

- determinare la quantità totale di materiale metallico in contatto elettrico con lo strato di materiale superconduttore in modo tale che la temperatura massima raggiunta dal materiale superconduttore in caso di corto  
25 circuito è inferiore alla temperatura minima fra la temperatura critica del materiale superconduttore e la temperatura di ebollizione di detto fluido di raffreddamento alla minima pressione operativa di detto fluido.

30 In accordo con una prima forma realizzativa della presente invenzione, la deformazione di detti nastri comprendenti materiale superconduttore, in corrispondenza ad una escursione termica tra la temperatura ambiente e la

- temperatura di esercizio del cavo è inferiore alla deformazione critica dei nastri stessi, tramite mezzi atti a limitare le sollecitazioni indotte longitudinalmente nelle strato di materiale superconduttore che comprendono
- 5 almeno una lamina di rinforzo di materiale metallico accoppiata, preferibilmente in modo sostanzialmente irreversibile, al rivestimento metallico del nastro superconduttore ed in collegamento elettrico con il materiale superconduttore.
- 10 In tal modo, durante il transitorio di corto circuito, la sovracorrente si ripartisce tra il materiale metallico del nastro, il materiale metallico dell'elemento tubolare di supporto e la lamina di rinforzo, collegati elettricamente in parallelo al materiale superconduttore e costituenti un
- 15 conduttore di tipo resistivo, by-passando quest'ultimo. Al termine del transitorio di corto circuito, la corrente può nuovamente essere trasportata dal materiale superconduttore in condizioni di superconduttività.
- In particolare, nell'elemento conduttore il collegamento
- 20 elettrico del materiale metallico del nastro con il materiale metallico dell'elemento tubolare di supporto da un lato e, dall'altro, con la lamina di rinforzo è realizzato o ponendo i suddetti materiali a diretto contatto tra loro, oppure interponendo tra essi elementi
- 25 conduttori di per sé noti.
- Preferibilmente, la lamina di rinforzo ha uno spessore non superiore alla metà dello spessore del rivestimento metallico e contribuisce vantaggiosamente ad aumentare la resistenza dell'elemento conduttore del cavo alle varie
- 30 sollecitazioni, meccaniche o termiche, ad esso impartite durante l'installazione o l'impiego.

Ancor più preferibilmente, tale spessore è compreso tra 0.03 e 0.08 mm.

- In una forma di realizzazione preferita dell'invenzione, la
- 35 resistenza dell'elemento conduttore del cavo alle varie

sollecitazioni ad esso impartite, può essere ulteriormente vantaggiosamente aumentata sottoponendo il materiale superconduttore ad un grado di precompressione prefissato in direzione longitudinale.

- 5    Tale precompressione viene preferibilmente ottenuta accoppiando la lamina di rinforzo al materiale di rivestimento del nastro di materiale superconduttore mentre viene simultaneamente applicata alla lamina una sollecitazione di trazione sostanzialmente diretta in  
10   direzione longitudinale.

Vantaggiosamente, si è riscontrato che una tale precompressione del materiale superconduttore è in grado di compensare parzialmente l'effetto di trazione applicato sul materiale superconduttore nella configurazione a teste  
15   bloccate del cavo quando quest'ultimo viene raffreddato dalla temperatura ambiente alla temperatura del fluido refrigerante.

La Richiedente ha in particolare riscontrato un minor degrado delle capacità di trasporto in condizioni di  
20   superconduttività del materiale superconduttore impiegato nel cavo rispetto ad un cavo superconduttore munito di nastri sprovvisti di tale lamina di rinforzo, a parità di materiali (e, quindi, di coefficienti di dilatazione termica), di geometria del cavo e di riduzione della  
25   temperatura all'atto del raffreddamento.

Preferibilmente, un elemento conduttore provvisto di nastri rinforzati del tipo suddetto viene ottenuto applicando alla lamina di rinforzo una sollecitazione di trazione compresa tra  $3.4 \times 10^7$  Pa (3.5 Kg/mm<sup>2</sup>) e  $34.3 \times 10^7$  Pa (35 Kg/mm<sup>2</sup>)  
30   mediante apparecchiature di per sé note, come ad esempio mediante due bobine, una di avvolgimento e l'altra di svolgimento, delle quali una viene frenata in modo opportuno.

Per effetto di tale sollecitazione di trazione, il  
35   materiale superconduttore dei nastri rinforzati così

PIRELLI CAVI E SISTEMI S.p.A.

- 10 -

ottenuti possiede un grado di precompressione  $\gamma$  in direzione longitudinale o "y", definito come:

$$\gamma = [(L_1 - L_2)/L_1] * 100$$

dove:

5  $L_1$  = lunghezza iniziale del nastro;

$L_2$  = lunghezza finale del nastro dopo precompressione;

compreso tra 0.05 e 0.2%.

10 In una forma di realizzazione alternativa, i mezzi atti a limitare le sollecitazioni indotte longitudinalmente nello strato di materiale superconduttore possono comprendere due lamine di rinforzo accoppiate a facce contrapposte del rivestimento metallico.

Preferibilmente, la lamina di rinforzo ed il rivestimento metallico sono reciprocamente accoppiati in modo  
15 sostanzialmente irreversibile mediante saldatura o brasatura ed in modo da garantire il mantenimento della desiderata precompressione del materiale superconduttore una volta realizzato l'accoppiamento. Convenientemente, il desiderato contatto elettrico tra la lamina di rinforzo ed  
20 il rivestimento metallico del materiale superconduttore viene automaticamente assicurato nel caso dell'accoppiamento mediante saldatura o brasatura.

Vantaggiosamente, il cavo dell'invenzione comprende una pluralità di nastri superconduttori avvolti a elica sulla  
25 superficie dell'elemento tubolare di supporto secondo un angolo di avvolgimento compreso tra  $5^\circ$  e  $60^\circ$ , e preferibilmente tra  $10^\circ$  e  $40^\circ$ . In tal modo, risulta vantaggiosamente possibile ridurre ulteriormente eventuali sollecitazioni meccaniche generate all'interno di ciascuno  
30 dei suddetti nastri.

Preferibilmente, la o le lamine di rinforzo ed il rivestimento metallico si detto almeno un nastro

superconduttore sono costituiti da un metallo scelto nel gruppo comprendente: rame, alluminio, argento, magnesio, nichel, bronzo, acciaio inossidabile, berillio, e loro leghe.

- 5 Ancor più preferibilmente, la o le lamine di rinforzo accoppiate al rivestimento metallico del o dei nastri superconduttori sono costituite da un metallo scelto nel gruppo comprendente: acciaio inossidabile, preferibilmente amagnetico, bronzo, berillio, alluminio, e loro leghe,  
10 mentre il rivestimento metallico dei nastri è costituito da un metallo scelto nel gruppo comprendente: argento, magnesio, alluminio, nichel, e loro leghe.

- In accordo con una seconda forma di realizzazione della presente invenzione, i mezzi atti a limitare le  
15 sollecitazioni indotte longitudinalmente nello strato di materiale superconduttore comprendono il suddetto elemento tubolare di supporto, che in questa forma di realizzazione è di tipo sostanzialmente composito, ossia comprendente un primo materiale metallico e un secondo materiale associato  
20 a detto primo materiale avente un coefficiente di dilatazione termica superiore di quello di detto primo materiale.

- Vantaggiosamente, l'elemento tubolare di supporto esplica simultaneamente le funzioni di mezzo atto a limitare le  
25 sollecitazioni indotte longitudinalmente nello strato di materiale superconduttore e di mezzo atto a supportare meccanicamente il materiale superconduttore, fornendo al tempo stesso una quantità di metallo, in collegamento elettrico con il materiale superconduttore, sufficiente a  
30 stabilizzare il cavo durante il transitorio di corto circuito.

- La Richiedente ha infatti riscontrato che l'impiego di un elemento tubolare di supporto sostanzialmente composito, e non esclusivamente costituito di materiale metallico,  
35 consente di ridurre le sollecitazioni impartite al



PIRELLI CAVI E SISTEMI S.p.A.

- 12 -

materiale superconduttore, sia in senso radiale che in senso longitudinale.

In particolare, si è riscontrato che tale elemento tubolare di supporto composito, grazie alla presenza del suddetto  
5 secondo materiale avente un più elevato coefficiente di dilatazione termica, presenta nel suo complesso un coefficiente di dilatazione termica superiore rispetto a quello del materiale superconduttore ed è quindi in grado durante la fase di raffreddamento del cavo di contrarsi  
10 radialmente in misura maggiore rispetto ai supporti interamente metallici.

In tal modo, il supporto composito dell'invenzione consente al materiale superconduttore di contrarsi in misura maggiore in direzione longitudinale e, quindi, consente di  
15 ridurre le sollecitazioni longitudinali all'interno del materiale superconduttore dovute alla cosiddetta contrazione impedita.

Vantaggiosamente, inoltre, l'utilizzo di un elemento tubolare di supporto composito consente di ridurre in modo  
20 sostanziale anche gli sforzi esercitati in senso longitudinale dalle estremità del cavo superconduttore sui terminali rispetto agli elementi tubolari interamente metallici qualora il secondo materiale dell'elemento tubolare di supporto composito presenti anche un modulo di  
25 Young (E) inferiore a quello del primo materiale metallico.

Gli sforzi longitudinali a cui il cavo è sottoposto in esercizio, infatti, sono proporzionali al prodotto del coefficiente di dilatazione termica e del relativo modulo di Young (E) del materiale costituente l'elemento tubolare  
30 di supporto.

Si è inoltre osservato che con un opportuno dimensionamento l'elemento tubolare di supporto composito comprende una quantità di materiale metallico, operante come conduttore normale ed in collegamento elettrico con il materiale  
35 superconduttore, sufficiente a stabilizzare il cavo durante

il transitorio di corto circuito. In particolare, durante il transitorio di corto circuito la sovracorrente, non potendo essere trasportata dal materiale superconduttore che ha temporaneamente perso le proprie caratteristiche di superconduttività, attraversa il materiale metallico in collegamento elettrico con il materiale superconduttore.

Per gli scopi dell'invenzione, il primo materiale metallico per la realizzazione dell'elemento di supporto composito è un metallo avente preferibilmente una resistività a 77 K <  $5 \cdot 10^{-9} \Omega m$ , un calore specifico a 77 K >  $10^6 J/m^3 K$  ed una conducibilità termica a 77 K > 5 W/mK.

In particolare, il primo materiale metallico dell'elemento di supporto composito è scelto nel gruppo comprendente: rame, alluminio, e loro leghe.

Preferibilmente, il suddetto secondo materiale è un materiale non metallico ed ha un coefficiente di dilatazione termica superiore a  $17 \cdot 10^{-6} ^\circ C^{-1}$ , preferibilmente superiore a  $20 \cdot 10^{-6} ^\circ C^{-1}$ , e ancor più preferibilmente compreso fra 40 e  $60 \cdot 10^{-6} ^\circ C^{-1}$ .

In una forma di realizzazione preferita, il suddetto secondo materiale non metallico è una materia plastica.

Per gli scopi dell'invenzione, essa è preferibilmente scelta nel gruppo comprendente: poliammide, come ad esempio nylon, politetrafluoroetilene (PTFE), polietilene.

I valori della contrazione termica percentuale ( $\alpha$ ) tra la temperatura ambiente e 77K e del modulo di Young (E) a 77K di alcuni materiali previsti per l'utilizzo nella realizzazione dell'elemento di supporto composito secondo l'invenzione, sono forniti nella tabella che segue.



PIRELLI CAVI E SISTEMI S.p.A.

- 14 -

Materiale	$\epsilon$ (%)	E (GPa)
Cu	5.30	100
Al	0.39	77
Ag	0.36	100
PTFE	2.00	5

In una forma di realizzazione vantaggiosa, i suddetti primo e secondo materiale sono realizzati in forma di settori anulari adiacenti. Tale geometria consente, in particolare, di rendere agevole la fase di realizzazione dell'elemento  
5 tubolare composito stesso.

Per gli scopi dell'invenzione, il numero di settori di detti primo e secondo materiale e la disposizione di tali settori possono essere agevolmente determinati da un tecnico del ramo in base alle esigenze costruttive del  
10 cavo.

Preferibilmente, il numero di settori per la realizzazione di un elemento tubolare di supporto composito è compreso tra 3 e 50. In una forma di realizzazione preferita, tale numero viene scelto in relazione al diametro esterno  
15 dell'elemento tubolare di supporto composito ed allo spessore dei settori in modo tale che il rapporto "K" tra lo spessore "s" del settore e la sua larghezza "l" sia compreso tra 0.4 e 0.7.

Preferibilmente, i settori di detti primo e secondo  
20 materiale sono disposti in alternanza tra loro. Tale configurazione consente infatti di realizzare un elemento tubolare di supporto avente caratteristiche meccaniche relativamente omogenee, le quali consentono di garantire sia una adeguata stabilità dinamica della macchina  
25 conduttrice utilizzata per realizzare l'elemento tubolare di supporto, sia la congruenza meccanica dell'elemento tubolare di supporto composito nel suo complesso durante il

raffreddamento del cavo.

Preferibilmente, i settori anulari di detti primo e secondo materiale sono avvolti ad elica secondo un angolo di avvolgimento compreso fra  $5^\circ$  e  $50^\circ$ . In tal modo, è  
5 possibile assicurare un adeguato e duraturo serraggio fra settori adiacenti.

In una forma di realizzazione alternativa, l'elemento tubolare di supporto composito del materiale superconduttore può comprendere un elemento tubolare  
10 interno costituito essenzialmente da detto secondo materiale sul quale sono avvolti sottili lamine o fili essenzialmente costituiti da detto primo materiale metallico.

Anche in questo caso e come sopra esposto, le lamine o i  
15 fili possono essere vantaggiosamente avvolti ad elica sull'elemento tubolare interno.

In accordo con una terza forma di realizzazione dell'invenzione, i mezzi atti a limitare le sollecitazioni indotte longitudinalmente nello strato di materiale  
20 superconduttore comprendono l'elemento tubolare composito, più sopra descritto, ed almeno una lamina di rinforzo metallica accoppiata ai o al nastro di materiale superconduttore.

Il cavo superconduttore dell'invenzione può essere sia un  
25 cavo coassiale, sia un cavo non coassiale.

Nel seguito della descrizione e nelle successive rivendicazioni, con il termine di: cavo coassiale, si intende indicare un cavo comprendente un elemento tubolare di supporto, un conduttore di fase circondante  
30 coassialmente l'elemento tubolare di supporto, uno strato di materiale dielettrico esterno al conduttore di fase ed un conduttore di ritorno supportato dallo strato di materiale dielettrico e coassiale al conduttore di fase.

PIRELLI CAVI E SISTEMI S.p.A.

- 16 -

Per gli scopi dell'invenzione, all'interno del conduttore di ritorno circola una corrente uguale e opposta a quella circolante nel conduttore di fase tale da generare un campo magnetico uguale ed opposto a quello generato dalla corrente circolante nel conduttore di fase, in modo da confinare il campo magnetico nella porzione del cavo compresa fra i due conduttori e ridurre la presenza di correnti dissipative nelle porzioni di cavo supportate esternamente al conduttore di ritorno.

- 10 Preferibilmente, il conduttore di ritorno comprende almeno un nastro superconduttore includente uno strato di materiale superconduttore incorporato all'interno di un rivestimento metallico e una quantità prefissata di materiale metallico (metallo di stabilizzazione) in
- 15 contatto elettrico con il rivestimento metallico ed avente la funzione di consentire la stabilizzazione del materiale superconduttore in condizioni di corto circuito.

Preferibilmente, inoltre, la quantità complessiva di metallo di stabilizzazione viene determinata applicando lo stesso criterio di stabilità piena ed adiabatica applicato

20 per il conduttore di fase e che verrà riportato nel seguito della descrizione.

Preferibilmente, il metallo di stabilizzazione è ripartito in una pluralità di piattine o nastri, aventi uno spessore

25 compreso tra 0.1 e 5mm, a diretto contatto, ad esempio avvolte, sul rivestimento metallico del nastro superconduttore.

In una forma di realizzazione alternativa, il conduttore di ritorno può comprendere almeno una lamina di rinforzo

30 metallica accoppiata, preferibilmente in modo sostanzialmente irreversibile, al rivestimento metallico del materiale superconduttore ed interposta tra esso ed il metallo di stabilizzazione.

Analogamente a quanto accade per il conduttore di fase, il

35 conduttore di ritorno perde le sue capacità conduttive

durante il transitorio di corto circuito e la corrente passa attraverso il materiale metallico di stabilizzazione, la lamina di rinforzo (se presente) ed il rivestimento metallico dei nastri (se presente), per poi tornare a  
5 fluire nel materiale superconduttore al termine del corto circuito.

Convenientemente, il metallo di stabilizzazione nel conduttore di ritorno può essere ripartito in piattine o fili, ad esempio di rame o altro idoneo metallo, associati  
10 ai nastri superconduttori e, come tali, presentanti anch'essi un avvolgimento ad elica come i nastri stessi.

Preferibilmente, il cavo superconduttore dell'invenzione viene raffreddato mediante un idoneo fluido refrigerante pressurizzato e sottoaffreddato, in modo tale da  
15 assicurare lo scambio termico necessario al funzionamento del cavo e da garantire il mantenimento di una temperatura adeguatamente inferiore alla temperatura critica del materiale superconduttore anche per lunghezze elevate del cavo.

20 Durante il suo percorso, infatti, il fluido refrigerante è soggetto simultaneamente sia ad un progressivo riscaldamento, a seguito dell'assorbimento di calore da parte degli elementi che compongono il cavo, sia ad una progressiva perdita di pressione, dovuta alle perdite  
25 idrauliche nell'attraversamento del cavo ed al moto più o meno turbolento del fluido stesso.

La scelta delle condizioni operative del cavo viene quindi fatta tenendo conto di tali fenomeni. In particolare, vengono preferite condizioni operative tali da mantenere il  
30 fluido refrigerante il più possibile lontano dai valori di temperatura e pressione della propria curva di saturazione. Tali condizioni operative sono comprese all'interno della cosiddetta "finestra operativa", la quale delimita una porzione del diagramma di stato del fluido refrigerante  
35 all'interno della quale si è in condizioni di sicurezza

- 18 -

relativamente alla necessità di raffreddare il materiale superconduttore al di sotto della propria temperatura critica mantenendo il fluido refrigerante allo stato liquido.

- 5 Vantaggiosamente, l'impiego di fluido refrigerante pressurizzato e sottoraffreddato consente, inoltre, di ridurre la quantità di materiale metallico impiegato come metallo di stabilizzazione. Maggiormente il fluido è pressurizzato e sottoraffreddato minore è la quantità di
- 10 metallo impiegato.

Preferibilmente, il materiale superconduttore è del tipo cosiddetto ad alta temperatura ( $T_c$  dell'ordine di circa 110K) ed è raffreddato ad una temperatura compresa tra circa 63K e 90K.

- 15 Tale raffreddamento viene preferibilmente conseguito impiegando come fluido refrigerante azoto liquido avente una pressione operativa compresa tra 10 e 20 bar.

- In accordo con l'invenzione, le forme realizzative del cavo superconduttore precedentemente descritto possono essere
- 20 molteplici. In particolare e come più sopra esposto, il cavo dell'invenzione può essere coassiale o non coassiale, la fase o le tre fasi presenti possono essere mono o multielemento, l'isolamento elettrico può essere sia in ambiente criogenico (dielettrico freddo) o a temperatura
- 25 ambiente (dielettrico caldo), l'isolamento termico può essere realizzato su ogni singola fase o sulle tre fasi riunite.

#### Breve descrizione delle figure

- Ulteriori caratteristiche e vantaggi della presente
- 30 invenzione risulteranno meglio dalla seguente descrizione dettagliata di alcune forme di realizzazione preferite, fatta qui di seguito, con riferimento ai disegni allegati. Nei disegni:

- la figura 1 mostra una vista prospettica ed in parziale sezione di un cavo superconduttore trifase coassiale, multielemento secondo una prima forma di realizzazione della presente invenzione;

5 - la figura 2 mostra una vista prospettica in scala ingrandita ed in parziale sezione, di un elemento del cavo coassiale della precedente figura 1;

- la figura 3 mostra una vista prospettica in scala ingrandita ed in parziale sezione, di una seconda forma di  
10 realizzazione di un elemento del cavo coassiale della precedente figura 1, in cui sia il conduttore di fase che il conduttore di ritorno sono provvisti di una lamina di rinforzo;

- la figura 4 mostra una vista prospettica ed in parziale  
15 sezione di un cavo superconduttore non coassiale monofase, multielemento, secondo una ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione.

Descrizione dettagliata delle forme di realizzazione preferite

20 Con riferimento alla figura 1, un cavo superconduttore 1, trifase coassiale, in accordo con la presente invenzione, comprende un nucleo superconduttore, globalmente indicato con 2, comprendente una pluralità di elementi conduttori 3, indicati con 3a, 3b, 3c per ciascuna delle fasi, alloggiati  
25 - preferibilmente in modo lasco - all'interno di un involucro tubolare 9 di contenimento, ad esempio in materiale metallico, come acciaio, alluminio e simili.

Ciascuno degli elementi conduttori 3 comprende a sua volta una coppia di conduttori coassiali, rispettivamente di fase  
30 4 e di ritorno 5, includenti ciascuno almeno uno strato di materiale superconduttore, come meglio apparirà nel seguito.

I conduttori coassiali di fase 4 e di ritorno 5 sono



PIRELLI CAVI E SISTEMI S.p.A.

- 20 -

elettricamente isolati tra loro, mediante interposizione di uno strato 8 di materiale dielettrico, sul quale è direttamente supportato il conduttore di ritorno 5.

5 Il cavo 1 comprende inoltre appropriati un circuito di raffreddamento per la circolazione di un fluido refrigerante atto a raffreddare il nucleo superconduttore 2 ad una temperatura adeguatamente inferiore alla temperatura critica del materiale superconduttore prescelto, che nel cavo di figura 1 è del tipo ad alta temperatura.

10 Il suddetto circuito di raffreddamento comprende adeguati mezzi di pompaggio, di per sé noti e quindi non rappresentati, destinati ad alimentare un appropriato fluido refrigerante, ad esempio azoto liquido ad una temperatura tipicamente compresa tra 65 e 90 K, sia  
15 all'interno di ciascuno degli elementi conduttori 3, sia negli interstizi tra tali elementi e l'involucro tubolare 9.

Allo scopo di ridurre al minimo le dispersioni termiche verso l'ambiente esterno, il nucleo superconduttore 2 è  
20 racchiuso entro una struttura di contenimento, o criostato, 10 comprendente un isolamento termico, formato, ad esempio, da una pluralità di strati sovrapposti, ed almeno una guaina di protezione.

Un criostato, noto nell'arte, è descritto ad esempio in un  
25 articolo di IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, vol. 7, no. 4, Ottobre 1992, pagg. 1745-1753.

Più in particolare, nell'esempio illustrato, il criostato  
10 comprende uno strato 11 di materiale isolante termico, costituito, ad esempio, da più nastri (per esempio alcune  
30 decine) di resina poliestere, metallizzati superficialmente, noti nel campo come "superisolante termico", avvolti in modo lasco, con l'eventuale ausilio di elementi distanziatori interposti 13.

Tali nastri sono alloggiati in una intercapedine anulare

12, delimitata da un elemento tubolare di supporto 14, nella quale viene mantenuto, con apparecchiature di per sé note, un vuoto dell'ordine di  $10^{-2}$  N/m<sup>2</sup>.

5 L'elemento tubolare di supporto 14, metallico, è atto a conferire la desiderata impermeabilità alla intercapedine anulare 12, ed è rivestito da una guaina esterna 15, ad esempio in polietilene.

10 L'elemento tubolare di supporto metallico 14 è preferibilmente formato da un nastro ripiegato in forma tubolare e saldato longitudinalmente, in acciaio, rame, alluminio o simili, ovvero da un tubo estruso o simili.

Ove le esigenze di flessibilità del cavo lo richiedano, l'elemento 14 può essere corrugato.

15 In aggiunta agli elementi descritti, possono inoltre essere presenti elementi di trazione del cavo, collocati assialmente o perifericamente in base alle esigenze costruttive e di impiego di esso, per garantire la limitazione delle sollecitazioni meccaniche applicate agli elementi conduttori 3; tali elementi di trazione, non  
20 rappresentati, possono essere costituiti, secondo tecniche ben note nel settore, da armature metalliche disposte perifericamente, ad esempio da fili di acciaio cordati, ovvero da una o più corde metalliche assiali, ovvero ancora da armature in fibre in materiale dielettrico, per esempio  
25 fibre aramidiche.

Per ciascuna fase sono presenti più elementi conduttori, in particolare, come illustrato a titolo di esempio in figura 1, ciascuna fase (a, b, c) comprenda due elementi conduttori, rispettivamente indicati con i pedici 1, 2 per  
30 ciascuno dei tre elementi conduttori 3a, 3b, 3c illustrati, in modo che la corrente di ciascuna fase sia ripartita su più conduttori (due nell'esempio illustrato).

In figura 2 è mostrato, in prospettiva ed in scala ingrandita, uno degli elementi conduttori 3 del cavo



PIRELLI CAVI E SISTEMI S.p.A.

- 22 -

superconduttore coassiale 1 della precedente figura 1.

Per semplicità di descrizione, nella presente figura 2 e nelle successive figure 3 e 4, i componenti del cavo strutturalmente o funzionalmente equivalenti a quelli precedentemente illustrati con riferimento alla figura 1 saranno indicati con gli stessi numeri di riferimento e non verranno ulteriormente descritti.

L'elemento conduttore 3a1, mostrato in figura 2, comprende un elemento tubolare composito 6 includente una pluralità di settori anulari 16, 17 rispettivamente di materia plastica, ad esempio di politetrafluoroetilene, e di materiale metallico, ad esempio di rame, disposti in alternanza tra loro e avvolti ad elica.

I conduttori coassiali 4 di fase e 5 di ritorno includono ciascuno una pluralità di nastri superconduttori 18a e, rispettivamente, 18b avvolti ad elica rispettivamente sull'elemento tubolare composito 6 e sullo strato 8 di materiale dielettrico. Tali nastri superconduttori 18a, 18b comprendono ciascuno uno strato di materiale superconduttore 20 racchiuso entro un rivestimento metallico 19.

Il conduttore di ritorno 5 comprende ulteriormente una pluralità di piattine 7 di rame, agenti da metallo di stabilizzazione, in contatto elettrico con il rivestimento metallico 19 dei nastri superconduttori 18b sul quale sono avvolti in modo di per sé noto.

Nella ulteriore forma di realizzazione degli elementi conduttori 3 del cavo 1 illustrata in figura 3, i conduttori coassiali 4 di fase e 5 di ritorno, includono ulteriormente una pluralità di lamine 21 di rinforzo metalliche accoppiate in modo sostanzialmente irreversibile, ad esempio per brasatura, al rivestimento metallico 19 dei nastri superconduttori 18a, 18b.

Preferibilmente, le lamine 21 di rinforzo del conduttore 4

di fase sono accoppiate ad una faccia radialmente interna del rivestimento metallico 19, così da interporli tra l'elemento tubolare composito 6 ed i nastri 18a e fungere in tal modo da elementi di protezione meccanica di questi  
5 ultimi.

In tal modo, le lamine 21 risultano in contatto elettrico sia con il rivestimento metallico 19 dei nastri superconduttori 18a sia con i settori anulari 17 di materiale metallico del l'elemento tubolare composito 6.

10 Preferibilmente, le lamine 21 di rinforzo dei conduttore 5 di ritorno sono disposte in modo speculare rispetto a quelle del conduttore di fase 4 e, cioè, sono accoppiate ad una faccia radialmente esterna del rivestimento metallico 19 dei nastri 18b, così da interporli tra le piattine 7 di  
15 rame ed i nastri e fungere in tal modo da elementi di protezione meccanica di questi ultimi.

In tal modo, le lamine 21 risultano in contatto elettrico sia con il rivestimento metallico 19 dei nastri superconduttori 18b sia con il metallo di stabilizzazione  
20 (piattine 7 di rame).

Vantaggiosamente, inoltre, le lamine 21 di rinforzo dei conduttori coassiali 4 di fase e 5 di ritorno contribuiscono in tal modo sia ad assicurare la  
25 criostabilità del cavo 1 in caso di corto circuito, sia a ridurre adeguatamente gli sforzi di trazione applicati ai terminali del cavo 1 qualora esse siano accoppiate ai nastri superconduttori 18a, 18b in modo tale da impartire al materiale superconduttore un grado di precompressione prefissato.

30 Nella forma di realizzazione di figura 4, che illustra un cavo superconduttore 1 non coassiale e monofase, invece, gli elementi conduttori  $3^I$ ,  $3^{II}$ , ...,  $3^{VII}$ , comprendono il solo conduttore di fase 4 il quale in questo caso include nastri superconduttori 18 avvolti ad elica sull'elemento  
35 tubolare di supporto composito 6.

- 24 -

In questa ulteriore forma di realizzazione, il criostato 10 comprende una intercapedine 22 al cui interno circola azoto liquido, definita tra l'involucro tubolare 9 ed un elemento tubolare di supporto 23.

- 5 Esternamente a questo cavo superconduttore non coassiale 1 monofase è previsto uno strato di materiale dielettrico 24 per l'isolamento elettrico del cavo superconduttore, incorporato all'interno di due elementi tubolari 25, 26 di materiale semiconduttore.
- 10 Con riferimento a quanto più sopra descritto, verranno qui di seguito forniti, a titolo indicativo e non limitativo, alcuni esempi atti ad illustrare il comportamento in condizioni di corto circuito, nonché le sollecitazioni meccaniche di alcune forme di realizzazione dei cavi
- 15 superconduttori secondo l'invenzione e di cavi secondo la tecnica nota.

#### ESEMPIO 1

##### (Invenzione)

- 20 In accordo con una forma realizzativa dell'invenzione, fu realizzato un prototipo di cavo superconduttore coassiale trifase per alta potenza del tipo ad alta temperatura e a dielettrico freddo comprendente una pluralità di elementi conduttori includenti ciascuno una coppia di conduttori di fase e di ritorno costituiti da nastri di materiale
- 25 superconduttore avvolti ad elica su rispettivi elementi di supporto.

- In particolare, il conduttore di fase è supportato da un elemento tubolare interamente metallico, mentre il conduttore di ritorno è supportato da uno strato di
- 30 materiale dielettrico esterno e coassiale al conduttore di fase.

I nastri superconduttori di entrambi i conduttori di fase e di neutro sono provvisti di lamine di rinforzo metalliche,

dello spessore di 0.05 mm, accoppiate al rivestimento metallico dei nastri stessi.

Il conduttore di ritorno è altresì provvisto di piattine di rame (metallo di stabilizzazione) in contatto elettrico con  
5 le lamine di rinforzo metalliche accoppiate al rivestimento metallico dei nastri superconduttori.

La fase di accoppiamento della lamina di rinforzo ai nastri superconduttori fu realizzata sottoponendo, in un primo stadio, la lamina di rinforzo ad una sollecitazione di  
10 trazione in direzione sostanzialmente longitudinale, ed accoppiandola, in un secondo stadio, ai nastri in modo tale da ottenere una precompressione del materiale superconduttore. In particolare, la lamina venne sottoposta ad una sollecitazione di trazione di circa  $15.4 \cdot 10^7$  Pa  
15 ( $15.7 \text{ Kg/mm}^2$ ) ottenendo un grado di precompressione del materiale superconduttore pari a circa 0.1%.

Il metallo impiegato per l'elemento tubolare di supporto del conduttore di fase fu il rame.

Le caratteristiche operative considerate per la  
20 realizzazione del prototipo del cavo furono le seguenti:

- potenza	0.7 GVA
- tensione nominale (fase-fase)	132 kV
- corrente nominale	3070 A
- corrente critica	9210 A
25 - lunghezza	50 km

Il cavo venne in modo tale da risultare stabile alle seguenti condizioni di corto circuito:

- corrente di corto circuito $I_{cc}$	50 kA
- durata del corto circuito $\Delta t_{cc}$	0.5 s

assumendo inoltre:

- 1) che la potenza dissipata durante il transitorio di corto circuito si traduca per intero in un aumento di temperatura dello strato di materiale superconduttore, del rivestimento metallico che incorpora il materiale superconduttore e del metallo comunque in contatto elettrico con quest'ultimo (elemento tubolare di supporto, lamina di rinforzo metallica e piattine di rame),
- 2) che la dissipazione sia resistiva con passaggio di tutta la corrente di corto circuito, nel materiale metallico in collegamento elettrico con il materiale superconduttore,
- 3) di limitare la temperatura massima raggiunta dal superconduttore al termine del corto circuito ben al di sotto della temperatura massima ammissibile  $T_{amm}$ , definita come la temperatura minima tra la temperatura critica del superconduttore e la temperatura di ebollizione del fluido refrigerante alla minima pressione operativa, assumendo che l'aumento di temperatura  $\Delta T$  dovuto al corto circuito sia data dalla seguente relazione:

$$\Delta T_{amm} \leq (T_{amm} - T_{max operativa}) / f$$

dove  $T_{max operativa}$  è la temperatura massima operativa ed  $f$  è il coefficiente di sicurezza.

Un cavo realizzato secondo le suddette caratteristiche operative ha i seguenti campi di funzionamento di temperatura e pressione per l'azoto liquido:

- temperatura minima operativa = 63.2 K
- temperatura massima operativa = 82 K
- pressione massima operativa = 20 bar
- pressione minima operativa = 10 bar

Assumendo di utilizzare un superconduttore ad alta temperatura del tipo ESCO avente una temperatura critica

di circa 110 K, e poiche la temperatura di ebollizione dell'azoto liquido alla pressione di 10 bar è pari a 104K, la temperatura massima ammissibile  $T_{am}$  coinciderà con quest'ultimo valore.

- 5 La determinazione della quantità di materiale metallico per assicurare la stabilità del cavo in condizioni di corto circuito avviene secondo la seguente formula:

$$\Delta T_{am} = [(\sum R_i I_{cci}^2) / (\sum m_i c_{pi})] * \Delta t_{cc} \quad (I)$$

dove:

- 10  $\Delta T_{am}$  rappresenta l'aumento di temperatura ammissibile dovuto al corto circuito,

$R_i$  rappresenta la resistenza dell'elemento i-esimo del cavo superconduttore,

- 15  $I_{cci}$  rappresenta la corrente di corto circuito dell'elemento i-esimo del cavo superconduttore,

$m_i$  rappresenta la massa dell'elemento i-esimo del cavo superconduttore,

$c_{pi}$  rappresenta il calore specifico dell'elemento i-esimo del cavo superconduttore,

- 20  $\Delta t_{cc}$  rappresenta la durata del corto circuito.

Risulta:

$$m_i = \delta_i * V_i = \delta_i * S_i * l_i \quad (II)$$

dove:

$\delta_i$  rappresenta la densità dell'elemento i-esimo,

- 25  $V_i$  rappresenta il volume dell'elemento i-esimo,

$S_i$  rappresenta la sezione trasversale dell'elemento i-esimo,

PIRELLI CAVI E SISTEMI S.p.A.

- 28 -

$l_i$  rappresenta la lunghezza dell'elemento  $i$ -esimo.

Risulta ancora:

$$R_i = \rho_i * (l_i / S_i) \quad (III)$$

dove  $\rho_i$  rappresenta la resistività elettrica specifica  
5 dell'elemento  $i$ -esimo.

Poiché i valori di  $\Delta T_{adm}$ ,  $\delta_i$ ,  $l_i$ ,  $\rho_i$ ,  $I_{cci}$ ,  $C_{pi}$ ,  $\Delta t_{cc}$ , così  
come le sezioni trasversali dei nastri superconduttori,  
delle lamine metalliche di rinforzo e delle piattine di  
rame sono dati noti di progetto, sostituendo le equazioni  
10 (II) e (III) nella (I), è possibile determinare la sezione  
trasversale del materiale metallico dell'elemento tubolare  
di supporto.

Le caratteristiche strutturali del cavo realizzato secondo  
il suddetto criterio di stabilità piena ed adiabatica e  
15 l'aumento di temperatura  $\Delta T$  del materiale superconduttore  
in caso di corto circuito sono riportate nella seguente  
Tabella I relativamente ai casi - indicati con 1a e 1b -  
ottenuti assumendo che il coefficiente di sicurezza  $f$  sia  
pari, rispettivamente, a 4,4 e 2,2.

20 In particolare, vengono riportate le caratteristiche  
strutturali del solo conduttore di fase, potendosi  
determinare, in maniera del tutto analoga, le  
caratteristiche strutturali per il conduttore di ritorno  
dato che la stessa corrente di corto circuito percorre  
25 entrambi.

Come si può rilevare da tale Tabella, il cavo  
dell'invenzione consente di limitare l'aumento di  
temperatura  $\Delta T$  subito dal materiale superconduttore in caso  
di corto circuito a 5°C (caso 1a) e, rispettivamente a 10°C  
30 (caso 1b) garantendo appieno il rispetto del criterio di  
stabilità piena ed adiabatica del cavo.



ESEMPIO 2 - 3

(Invenzione)

In accordo con ulteriori forme di realizzazione dell'invenzione, furono realizzati due ulteriori prototipi  
 5 di cavo coassiale comprendenti 3 elementi conduttori includenti ciascuno una coppia di conduttori di fase e di ritorno costituiti da nastri di materiale superconduttore avvolti ad elica su un rispettivo elemento di supporto costituito in questo caso da un elemento tubolare composito  
 10 per il conduttore di fase e dallo strato di materiale dielettrico per il conduttore di ritorno.

In particolare, l'elemento tubolare di supporto composito venne realizzato con settori anulari di rame (primo materiale metallico) e di politetrafluoroetilene, disposti  
 15 in alternanza tra loro ed aventi un diametro interno pari a 38,7 mm ed un diametro esterno pari a 48,5, essenzialmente per obbedire a vincoli impiantistici e di refrigerazione. Il numero di settori preferito per tale configurazione è risultato essere pari a 14. L'area della sezione del  
 20 singolo settore è di 47,9 mm<sup>2</sup>.

Analogamente al caso del precedente esempio 1, il conduttore di ritorno era provvisto di piattine di rame (metallo di stabilizzazione) in contatto elettrico con i nastri superconduttori.

25 I nastri superconduttori erano provvisti di una lamina di rinforzo metallica accoppiata al rivestimento metallico dei nastri superconduttori analoga a quella dell'esempio 1 (esempio 2) o erano sprovvisti di tale lamina (esempio 3).

Inoltre, analogamente al caso del precedente esempio 1, la  
 30 fase di accoppiamento della lamina di rinforzo ai nastri superconduttori fu realizzata sottoponendo, in un primo stadio, la lamina di rinforzo ad una sollecitazione di trazione in direzione sostanzialmente longitudinale, ed accoppiandola, in un secondo stadio, ai nastri in modo tale



PIRELLI CAVI E SISTEMI S.p.A.

- 30 -

da ottenere una precompressione del materiale superconduttore.

In particolare, la lamina venne sottoposta ad una sollecitazione di trazione di circa  $15.4 \times 10^7$  Pa (15.7 Kg/mm<sup>2</sup>) ottenendo un grado di precompressione del materiale superconduttore pari a circa lo 0.1%.

Le caratteristiche strutturali dei due prototipi di cavo sono riportate nella successiva Tabella I.

Da un'analisi dei dati della suddetta Tabella I, nel caso in cui l'incremento di temperatura massimo accettabile sia di 10 °C, gli esempi 2 e 3 forniscono gli stessi risultati dell'esempio 1b, in quanto il contributo della lamina di rinforzo dei nastri di materiale superconduttore è risultato essere trascurabile ai fini dell'aumento di temperatura.

Relativamente alla geometria del cavo, risulta che l'elemento tubolare composito degli Esempi 2 e 3 ha uno spessore maggiore rispetto all'elemento tubolare interamente metallico del cavo dell'esempio 1b a causa della necessità di fornire una quantità di rame idonea a garantire la stabilità del cavo in condizioni di corto circuito in presenza di una opportuna quantità di politetrafluoroetilene.

## ESEMPIO 4

25 (Confronto)

Fu realizzato un cavo avente le stesse caratteristiche del precedente esempio 1, dimensionando però quest'ultimo senza tener conto di alcun criterio di stabilità durante il transitorio di corto circuito. I risultati ottenuti sono riportati nella seguente Tabella II.

## ESEMPIO 5

(Confronto)

Sempre allo scopo di confronto, fu realizzato un cavo  
avente le stesse caratteristiche del precedente esempio 1,  
fatta salva l'assenza della lamina di rinforzo esternamente  
ai nastri di materiale superconduttore, adottando il  
5 criterio di stabilità piena ed adiabatica.

Nella sopracitata pubblicazione di E. W. Collings, "Flux-  
jump stability and cryostability in ceramic superconductors  
for 30 K", MRS Int'l. Mtg. on Adv. Mats. Vol. 6, 1989  
Materials Research Society, è riportata un'equazione che  
10 correla il rapporto "Rs" fra la somma delle aree del  
metallo di stabilizzazione e del metallo del rivestimento  
metallico dei nastri superconduttori e l'area totale del  
solo superconduttore a parametri quali la resistività  
elettrica  $\rho$  del metallo di stabilizzazione e la densità di  
15 corrente critica  $J_c$  dei nastri superconduttori.

Sostituendo tali valori, l'equazione sopracitata diventa:

$$R_s^2 \cdot (R_s + 1) = 9,27 \cdot J_c \quad (IV)$$

Conoscendo il rapporto fra l'area del rivestimento  
metallico del nastro superconduttore e l'area totale del  
20 superconduttore, è possibile ottenere il valore del  
rapporto fra l'area del metallo di stabilizzazione e quella  
del superconduttore.

I risultati sono riportati nella medesima Tabella II.

#### ESEMPIO 6

25 (Confronto)

Fu realizzato un cavo secondo le sole esigenze costruttive  
e/o tecnologiche, e cioè con il metallo aggiuntivo avente  
la sola funzione di supporto del conduttore di fase e  
protezione di quello di ritorno.

30 I risultati ottenuti sono riportati nella seguente Tabella  
II.

PIRELLI CAVI E SISTEMI S.p.A.

- 32 -

## ESEMPIO 7

(Confronto)

Con le stesse modalità del precedente esempio 4 furono realizzati due cavi 7a e 7b nei quali, a seguito  
5 dell'aumento della sola quantità di materiale superconduttore, il margine di sicurezza fu assunto pari, rispettivamente, a 4,4 e 2,2.

I risultati sono riportati nella medesima Tabella II.

Da un'analisi delle seguenti Tabelle I e II, risulta che i  
10 cavi realizzati in accordo con gli esempi 4 e 6 sono inadeguati per applicazioni pratiche, a causa di un aumento di temperatura ( $\Delta T$ ) troppo elevato in caso di corto circuito.

I cavi realizzati in accordo con gli Esempi 1-3  
15 garantiscono invece la stabilità del superconduttore ad alta temperatura ed il mantenimento dell'azoto in fase liquida con una quantità complessiva di materiale metallico in collegamento elettrico con il materiale superconduttore inferiore rispetto al cavo dell'esempio 5 e con una  
20 quantità di materiale superconduttore inferiore rispetto ai cavi 7a e 7b dell'esempio 7, con un conseguente risparmio economico.

## ESEMPIO 8

(Valutazione sollecitazioni meccaniche)

25 Allo scopo di confrontare le sollecitazioni meccaniche indotte longitudinalmente nel materiale superconduttore a seguito del suo raffreddamento mediante azoto liquido nella configurazione di utilizzo a teste bloccate, prototipi di cavo secondo gli esempi 1b, 2 e 3 vennero confrontati con  
30 il cavo dell'esempio 3.

È stata assunta, per la stabilità piena ed adiabatica nelle condizioni di corto circuito, una sezione minima

complessiva di materiale metallico pari a  $298.2 \text{ mm}^2$ .

Come primo materiale metallico per la realizzazione degli elementi tubolari di supporto compositi fu utilizzato il rame, mentre come secondo materiale non metallico fu  
5 utilizzato politetrafluoroetilene.

L'elemento tubolare di supporto degli esempi 1b e 5 venne realizzato a settori metallici, in particolare con settori di rame, in numero pari a 14 in modo tale da ottenere geometricamente la stessa struttura degli elementi tubolari  
10 di supporto compositi degli esempi 2 e 3.

I prototipi furono quindi sottoposti ad una serie di test che consentirono di valutare le deformazioni generate nel materiale superconduttore, la forza di trazione applicata dal cavo ai terminali come reazione alla contrazione  
15 impedita, ed infine la quantità di materiale conduttore utilizzata rispetto a quella necessaria ad assicurare al cavo la stabilità piena ed adiabatica secondo i criteri più sopra esposti.

I risultati di tali test sono riportati nella seguente  
20 Tabella III, nella quale è riportato anche il valore di deformazione critica, ossia il valore di deformazione al di sopra del quale sono state rilevate fratture e scollamenti dei grani del materiale superconduttore con conseguente diminuzione della capacità di trasporto della corrente da  
25 parte di quest'ultimo.

In relazione al valore di deformazione critica risulta immediato dai valori in Tabella III che i cavi provvisti di lamina di rinforzo, esempi 1b e 2, hanno un valore maggiore rispetto ai cavi sprovvisti di tale lamina; ciò può essere  
30 sostanzialmente attribuito all'effetto di precompressione dello strato di materiale superconduttore a seguito dell'accoppiamento della lamina al rivestimento metallico dei nastri.

Dai risultati della Tabella III è inoltre possibile

PIRELLI CAVI E SISTEMI S.p.A.

- 34 -

5 rilevare che per il cavo dell'esempio 5 la deformazione del materiale superconduttore ha un valore maggiore del valore critico, e ciò comprometterebbe la capacità del superconduttore di trasportare corrente in condizioni di superconduttività.

10 Ventaggiosamente, invece, in entrambi i prototipi degli esempi 2 e 5 le deformazioni a cui è sottoposto il materiale superconduttore, oltre ad essere sensibilmente inferiori al valore critico, sono anche nettamente inferiori rispetto a quelle rilevate per il prototipo dell'esempio 1b, a riprova dell'efficacia dell'elemento tubolare di supporto composto nel ridurre l'entità delle sollecitazioni longitudinali impartite al materiale superconduttore.

TABELLA I  
INVENZIONE

		materiale metallico elemento tubo di supporto	SC interno	$\Delta T$ (°C)
Es. 1a	sez. mm <sup>2</sup>	545	88.6	5
	Cu/SC	5.6		
Es. 1b	sez. mm <sup>2</sup>	335	88.6	10
	Cu/SC	3.9		
Es. 2	sez. mm <sup>2</sup>	335	88.6	10
	Cu/SC	3.3		
Es. 3	sez. mm <sup>2</sup>	325	88.6	10
	Cu/SC	3.6		

SC interno = strato materiale supercond. cond. interno (di fase)

5  $\Delta T$  = aumento di temperatura materiale superconduttore

24-12-1998

PIR050

EP98204401.8

SPEC

PIRELLI CAVI E SISTEMI S.p.A.

- 36 -

## TABELLA II

## CONFRONTO

		materiale metallico elemento tubolare di supporto	SC interni	$\Delta T$ (°C)
Es. 4	sez. mm <sup>2</sup>	0	88.6	620
	Cu/SC	-		
Es. 5	sez. mm <sup>2</sup>	1277.7	28.2	0
	Cu/SC	43.7		
Es. 6	sez. mm <sup>2</sup>	199	88.6	23.7
	Cu/SC	2.3		
Es. 7a	sez. mm <sup>2</sup>	199	615	5
	Cu/SC	0.32		
Es. 7b	sez. mm <sup>2</sup>	199	320	10
	Cu/SC	0.62		

SC interni = strato materiale supercond. cond. interno (di fase)

5  $\Delta T$  = aumento di temperatura materiale superconduttore

TABELLA III

	Es. 1b	Es. 2	Es. 3	Es. 5
deformazioni sul superconduttore (%)	0.31	0.18	0.19	0.31
deformazione critica (%)	0.5	0.5	0.29	0.29
forze di trazione (Kg)	11700	14100	13700	40000
quantità di rame (g)	100	100	100	100



PIRELLI CAVI E SISTEMI S.p.A.

- 38 -

## RIVENDICAZIONI

1. Cavo superconduttore (1) ad almeno una fase comprendente:

5 a) uno strato di nastri comprendenti materiale superconduttore (20);

10 b) un elemento tubolare (6) per il supporto di detto strato di nastri comprendenti materiale superconduttore (20), detto elemento tubolare comprendendo almeno una porzione in materiale metallico, ed essendo in contatto elettrico con lo strato di nastri comprendenti materiale superconduttore (20);

15 c) un circuito di raffreddamento, atto a raffreddare il materiale superconduttore ad una temperatura di esercizio non superiore alla sua temperatura critica, comprendente un fluido ad una pressione operativa prefissata variabile tra un valore minimo ed un valore massimo;

20 in cui la deformazione di detti nastri comprendenti materiale superconduttore, in corrispondenza ad una escursione termica tra la temperatura ambiente e la temperatura di esercizio del cavo è inferiore alla deformazione critica dei nastri stessi,

25 caratterizzato dal fatto che è presente una prefissata quantità di materiale conduttore di tipo resistivo in contatto elettrico con lo strato (20) di materiale superconduttore, tale che la temperatura massima raggiunta dal materiale superconduttore in caso di corto circuito inferiore alla temperatura minima fra la temperatura critica del materiale superconduttore e la temperatura di ebollizione di detto fluido di raffreddamento alla minima  
30 pressione operativa di detto fluido.

2. Cavo superconduttore (1) secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detto strato di nastri è incorporato all'interno di un rivestimento metallico (19).

3. Cavo superconduttore (1) secondo la rivendicazione 2, caratterizzato dal fatto che detto materiale superconduttore comprende almeno una lamina (21) di rinforzo di materiale metallico.
- 5 4. Cavo superconduttore (1) secondo la rivendicazione 3, caratterizzato dal fatto che detto materiale superconduttore comprende due lamine (21) di rinforzo di materiale metallico accoppiate a facce contrapposte di detto strato.
- 10 5. Cavo superconduttore (1) secondo le rivendicazioni 3 o 4, caratterizzato dal fatto che detto materiale superconduttore è sostanzialmente precompresso in direzione longitudinale.
- 15 6. Cavo superconduttore (1) secondo la rivendicazione 5, caratterizzato dal fatto che lo strato (20) di materiale superconduttore di detto almeno un nastro (18a, 18b) superconduttore ha un grado di precompressione in direzione longitudinale ( $\gamma$ ) compreso tra 0.05 e 0.2%.
- 20 7. Cavo superconduttore (1) secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che comprende una pluralità di nastri (18a, 18b) superconduttori avvolti a elica sulla superficie di detto almeno un elemento tubolare (6) di supporto secondo angoli di avvolgimento compresi tra 5° e 60°.
- 25 8. Cavo superconduttore (1) secondo le rivendicazioni 3 o 4, caratterizzato dal fatto che la lamina (21) di rinforzo ed il rivestimento metallico (19) di detti nastri (18a, 18b) superconduttore sono costituiti da un metallo scelto nel gruppo comprendente: rame, alluminio, argento, 30 magnesio, nichel, bronzo, acciaio inossidabile, berillio, e loro leghe.
9. Cavo superconduttore (1) secondo le rivendicazioni 1, 3 o 4, caratterizzato dal fatto che detto elemento tubolare (6) di supporto è sostanzialmente composito e comprende un

primo materiale metallico e un secondo materiale associato a detto primo materiale avente un coefficiente di dilatazione termica superiore di quello di detto primo materiale.

- 5 10. Cavo superconduttore (1) secondo la rivendicazione 9, caratterizzato dal fatto che detti primo e secondo materiale sono realizzati in forma di settori anulari (16, 17) adiacenti.
- 10 11. Cavo superconduttore (1) secondo la rivendicazione 10, caratterizzato dal fatto che detti settori anulari (16, 17) sono disposti in alternanza tra loro.
- 15 12. Cavo superconduttore (1) secondo la rivendicazione 10, caratterizzato dal fatto che detti settori anulari (16, 17) sono avvolti a elica secondo un angolo di avvolgimento compreso fra  $5^\circ$  e  $50^\circ$ .
- 20 13. Cavo superconduttore (1) secondo la rivendicazione 9, caratterizzato dal fatto che detto primo materiale metallico è un metallo avente una resistività a  $77\text{ K} < 5 \cdot 10^{-9}\ \Omega\text{m}$ , un calore specifico a  $77\text{ K} > 10^6\text{ J/m}^3\text{K}$  ed una conducibilità termica a  $77\text{ K} > 5\text{ W/mK}$ .
- 25 14. Cavo superconduttore (1) secondo la rivendicazione 9, caratterizzato dal fatto che detto secondo materiale è un materiale non metallico avente un coefficiente di dilatazione termica superiore a  $17 \cdot 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .
- 30 15. Cavo superconduttore (1) secondo la rivendicazione 14, caratterizzato dal fatto che detto secondo materiale non metallico è una materia plastica scelta nel gruppo comprendente: poliammide, politetrafluoroetilene e polietilene.
16. Elemento conduttore (3) per cavi superconduttori (1) comprendente almeno uno strato (20) di materiale superconduttore incorporato all'interno di un rivestimento metallico (19), supportato da un elemento tubolare (6)

- determinare la quantità totale di materiale metallico in contatto elettrico con lo strato (20) di materiale superconduttore in modo tale che la temperatura massima raggiunta dal materiale superconduttore in caso di corto
- 5 circuito è inferiore alla temperatura minima fra la temperatura critica del materiale superconduttore e la temperatura di ebollizione di detto fluido di raffreddamento alla minima pressione operativa di detto.
- 10 18. Metodo secondo la rivendicazione 17, caratterizzato dal fatto che il materiale superconduttore di detti nastri (18a, 18b) ha un grado di precompressione in direzione longitudinale ( $\gamma$ ) compreso tra 0.05 e 0.2%.
- 15 19. Metodo secondo la rivendicazione 17, caratterizzato dal fatto che l'elemento tubolare è sostanzialmente composito e comprende un primo materiale metallico e un secondo materiale associato a detto primo materiale avente un coefficiente di dilatazione termica superiore di quello di detto primo materiale.

- 41 -

- comprendente una quantità prefissata di materiale metallico con il quale è in contatto elettrico, detto strato (20) di materiale superconduttore è raffreddato mediante un fluido di raffreddamento ad una temperatura non superiore alla sua
- 5 temperatura critica, caratterizzato dal fatto che è presente una prefissata quantità di materiale conduttore di tipo resistivo in contatto elettrico con lo strato (20) di materiale superconduttore, tale che la temperatura massima raggiunta dal materiale superconduttore in caso di corto
- 10 circuito inferiore alla temperatura minima fra la temperatura critica del materiale superconduttore e la temperatura di ebollizione di detto fluido di raffreddamento alla minima pressione operativa di detto fluido.
- 15 17. Metodo atto a limitare le sollecitazioni andotte longitudinalmente in un nastro (18) di materiale superconduttore di un cavo superconduttore comprendente le fasi di:
- 20 - predisporre almeno un elemento tubolare (6) per il supporto di un nastro (18) di materiale superconduttore comprendente una quantità prefissata di materiale metallico, detto elemento tubolare (6) essendo in contatto elettrico con un nastro (18) di materiale superconduttore,
- 25 - avvolgere detto nastro (18) di materiale superconduttore a elica sulla superficie di detto almeno un elemento tubolare (6) di supporto,
- raffreddare il materiale superconduttore ad una temperatura non superiore alla sua temperatura critica mediante un fluido di raffreddamento,
- 30 caratterizzato dal fatto di comprendere le fasi di:
- accoppiare almeno una lamina (21) di rinforzo di materiale metallico accoppiata a detto nastro (18) di materiale superconduttore,

RIASSUNTO

E' descritto un cavo superconduttore (1) ad almeno una fase comprendente:

5 a) uno strato di nastri comprendenti materiale superconduttore (20);

10 b) un elemento tubolare (6) per il supporto di detto strato di nastri comprendenti materiale superconduttore (20), detto elemento tubolare comprendendo almeno una porzione in materiale metallico, ed essendo in contatto elettrico con lo strato di nastri comprendenti materiale superconduttore (20);

15 c) un circuito di raffreddamento, atto a raffreddare il materiale superconduttore ad una temperatura di esercizio non superiore alla sua temperatura critica, comprendente un fluido ad una pressione operativa prefissata variabile tra un valore minimo ed un valore massimo;

20 in cui la deformazione di detti nastri comprendenti materiale superconduttore, in corrispondenza ad una escursione termica tra la temperatura ambiente e la temperatura di esercizio del cavo è inferiore alla deformazione critica dei nastri stessi,

25 caratterizzato dal fatto che è presente una prefissata quantità di materiale conduttore di tipo resistivo in contatto elettrico con lo strato (20) di materiale superconduttore, tale che la temperatura massima raggiunta dal materiale superconduttore in caso di corto circuito inferiore alla temperatura minima fra la temperatura critica del materiale superconduttore e la temperatura di ebollizione di detto fluido di raffreddamento alla minima  
30 pressione operativa di detto fluido.

1/4

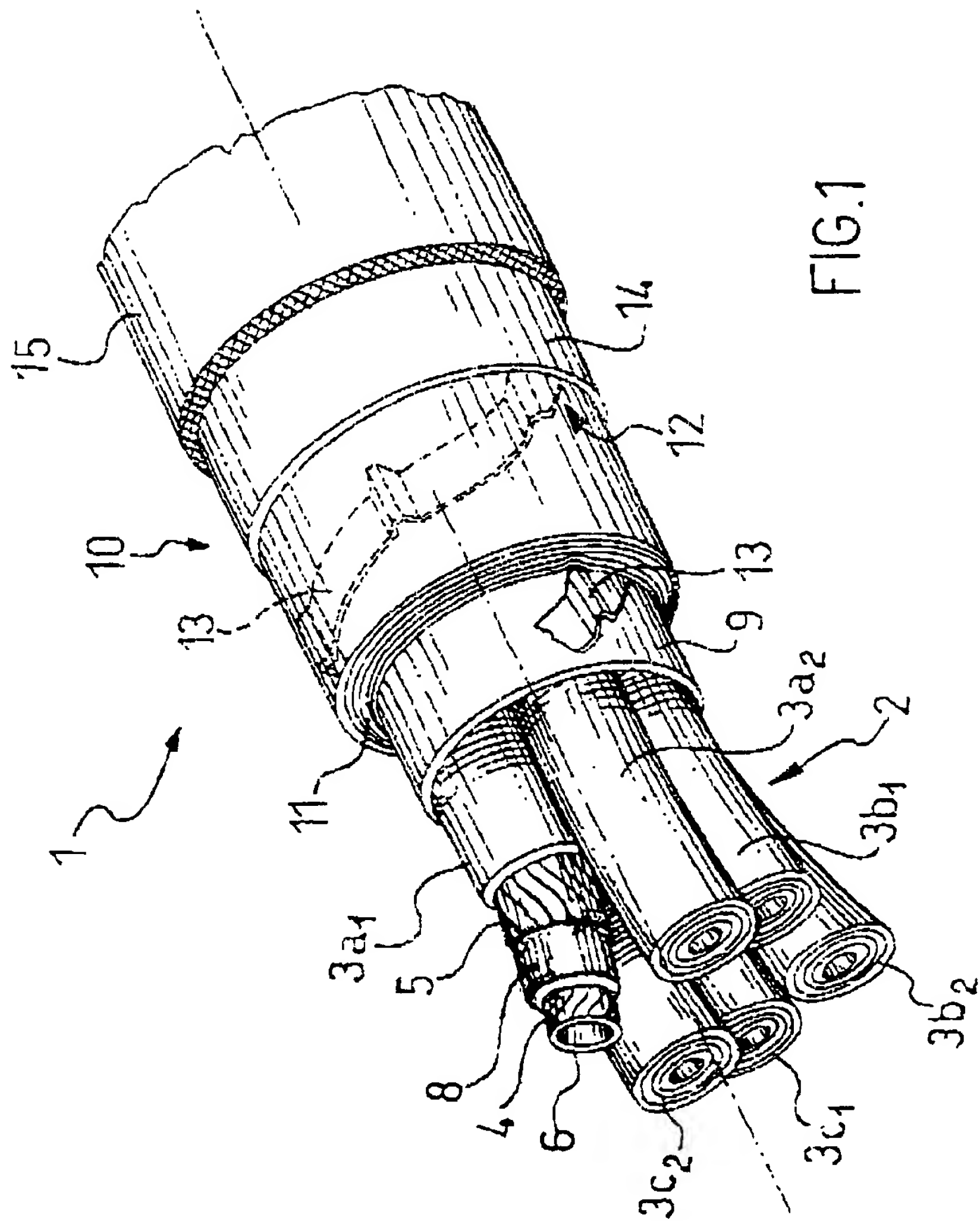


FIG. 1



